



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**KONSTRUKCE VÝUKOVÉHO MODELU KULIČKA
NA PLOŠINĚ**

CONSTRUCTION OF THE EDUCATIONAL MODEL BALL ON THE PLATFORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Vrána

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Adámek

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Zdeněk Vrána**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Roman Adámek**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce výukového modelu kulička na plošině

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat návrhem a konstrukcí nového výukového modelu, který by se měl používat k praktické aplikaci řídicích algoritmů navržených studenty mechatroniky během výuky. Model kulička na plošině se bude skládat z plošiny, která se může naklánět ve dvou osách a na níž bude umístěna kulička, jejíž poloha na plošině je snímána. Poloha kuličky je řízena prostřednictvím změny náklonu plošiny, realizovaného dvěma nezávislými pohony. Model bude řízen z prostředí Simulink prostřednictvím univerzální karty MF624.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte přehled různých provedení mechanické konstrukce plošiny, pohonů pro její naklánění, řídicí elektroniky a senzorů pro snímání polohy kuličky. Varianty v jednotlivých kategoriích vzájemně porovnejte.
2. Na základě vypracovaného přehledu vytvořte kompletní návrh vybraného řešení. Při návrhu zohledněte požadavky na vysokou robustnost, spolehlivost a přijatelnou cenu.
3. Návrh nejdříve validujte pomocí simulace v prostředí Simulink. Vytvořte zde model kuličky na plošině, vycházející z vašeho návrhu spolu s regulátorem pro řízení polohy kuličky. Ověřte, zda zvolené pohony splňují na ně kladené požadavky.
4. Vytvořte ukázkovou úlohu polohové regulace kuličky na plošině pro ověření funkčnosti výukového modelu. Dále vytvořte manuál, který bude k dispozici studentům ve výuce a ve kterém bude stručný popis modelu, schéma zapojení do karty MF624, nastavení modelu a popis jednotlivých vstupních a výstupních signálů.

Seznam doporučené literatury:

GREPL, Robert. Kinematika a dynamika mechatronických systémů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3530-8.

GREPL, Robert. Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-226-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a sestrojením výukového modelu kulička na plošině. V závěru práce je ověřena funkčnost modelu.

Abstract

This thesis deals with design and construction of an educational model of ball on a plate. The functionality of this model is verified in the end of this thesis.

Klíčová slova

Kulička na plošině, PID regulace, detekce kuličky, řízení

Keywords

Ball on plate, PID control, ball detection, control

Bibliografická citace

VRÁNA, Zdeněk. Konstrukce výukového modelu kulička na plošině [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129773>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Roman Adámek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Konstrukce výukového modelu kulička na plošině“ vypracoval samostatně s použitím uvedených pramenů.

9. května 2021

Zdeněk Vrána

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Romanu Adámkovi za rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Matejovi Rajchlovi. Velké díky patří všem zaměstnancům firmy Cazer s.r.o. za jejich ochotu a Vojtovi Zajíčkovi a Janu Košťálovi za bleskové reakce. Největší poděkování patří rodině za podporu.

Obsah

1	Úvod	8
2	Rešerše.....	9
2.1	Mechanický návrh.....	9
2.1.1	Možnosti uchycení plochy pro kuličku.....	9
2.1.2	Možnosti propojení motoru s deskou.....	10
2.2	Snímání polohy kuličky	11
2.2.1	Kamera.....	11
2.2.2	Dotykový panel.....	11
2.3	Motory.....	15
2.3.1	Modelářské servo	15
2.3.2	Stejnoseměrný motor	15
2.3.3	Krokový motor.....	15
2.4	Počáteční nastavení desky	16
2.4.1	Potenciometry	16
2.4.2	Čidla pro měření vzdálenosti	16
2.4.3	Enkodér.....	16
2.5	Existující řešení.....	17
2.6	Odvození rovnic	18
2.6.1	Minimální hmotnost kuličky.....	18
2.6.2	Rovnice pohybu kuličky	19
3	Postup a výsledky řešení	22
3.1	Zvolené řešení mechanického návrhu.....	22
3.2	Výpočty	23
3.2.1	Model v Simulinku	23
3.2.2	Hmotnost kuličky.....	24
3.3	Volba ostatních komponentů.....	25
3.4	Ukázková úloha.....	26
3.5	Návod	28
4	Závěr.....	29

1 Úvod

Při výuce Mechatroniky je kladen důraz na praktickou výuku. Výukové modely nabízí studentům možnost porovnat teoretické znalosti, které aplikují při tvorbě fyzikálního modelu v prostředí simulace, se skutečností. U obou modelů se tak dá porovnat, jak je aplikováno řízení, a zda změna parametrů ve fyzikálním modelu má stejný účinek na skutečném zařízení. Toto zjištění potom nabízí možnost naladit řízení pro fyzikální model (tedy bez přístupu ke skutečnému zařízení), a pak jej po případných drobných úpravách přímo aplikovat na zařízení. Proto byl vytvořen tento výukový model.

Studenti se prací s modelem naučí vytvářet PID regulaci polohy kuličky na plošině, pohyblivé ve dvou osách, uvidí, jak jednotlivé parametry ovlivňují přesnost a rychlost reakce na umístění kuličky na požadovanou pozici. Zároveň při práci s modelem uvidí využití dalších principů řízení strojů, jako například filtrování šumu měřených dat a navádění do počáteční polohy (homing). Protože budou využity kuličky různých rozměrů, a tedy i hmotností, půjde na modelu pozorovat, jaký vliv má moment setrvačnosti kuličky na její chování a regulaci.

Model najde využití v předmětu RPO, kde studenti používají model Double Drive, ve kterém jsou řízeny DC motory pomocí PID regulace.

2 Rešerše

V této kapitole budou probrána nejvhodnější řešení z pohledu mechanického návrhu, metody detekování polohy kuličky na plošině, volby pohonů, a možnosti sledování stavu modelu, konkrétně natočení plošiny. Zároveň budou ukázána existující řešení, a popsány jejich výhody a nedostatky.

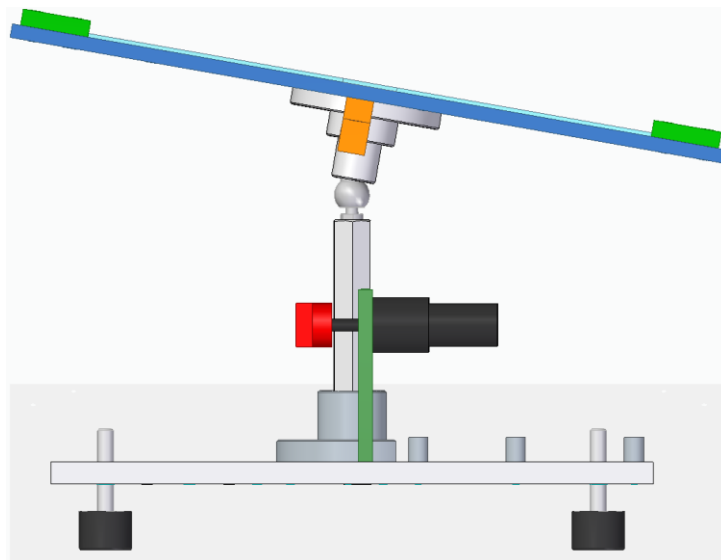
2.1 Mechanický návrh

2.1.1 Možnosti uchycení plochy pro kuličku

Táhla

Deska je ve středu uchycena k axiálnímu kloubu, který umožňuje náklon od osy přibližně 20 až 30 stupňů, dle konkrétního typu a výrobce. Naklání desky je potom realizováno ve dvou osách. Táhlo nebo lineární matice je poté přišroubováno ke středu té strany, na které ovládá zdvih.

Nevýhodou tohoto řešení je, že při zdvihu jedné z os dojde k natočení úchytu v druhé ose. Na obrázku 2.1-1 je vidět, že při naklonění desky (modrá) se natočí i úchyt pro druhou osu (oranžový), který tím pádem není kolmý na osu motoru (černá). Tato situace je vyřešena tím, že uchycení je zakončeno kloubovým okem, které natočení vyrovnává.



Obrázek 2.1 Naklonění táhla při natočení druhého motoru. Foto autor

Vnější nezávislá otočná uložení

Dalším způsobem, jak horní desku uchytit, jsou dvě nezávislá otočná uložení.

Horní deska (plocha pro kuličku), je pomocí otočného uložení spojena s vnějším rámem, který je pomocí druhého otočného uložení spojen se sloupkem, umístěným na podstavci zařízení. Uložení jsou umístěna kolmo k sobě, aby umožnila naklání ve 2 osách.

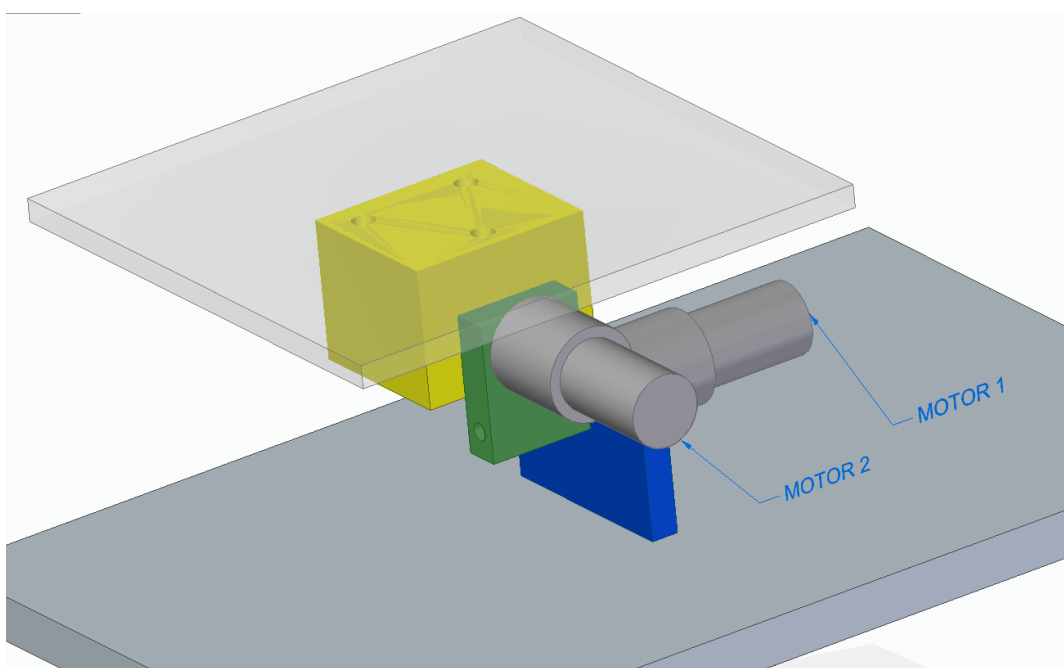
Výhodou je, že u jedné z os není potřeba využívat kloubová oka, neboť její natočení není ovlivňováno druhou osou.

Nevýhodou takového řešení je větší prostorová náročnost modelu, při zachování stejné velikosti plochy pro pohyb kuličky, kvůli vnějšímu rámu.

Přímé uchycení desky na ose motoru

Další varianta, jak naklánět s deskou (a kuličkou), je montáž desky na osu motoru. Tuto konstrukci popisuje obrázek 2.2. První motor (na obrázku Motor 1) je připevněn k podložce (šedá) pomocí úchyty (modrý), druhý motor (na obr. Motor 2) je připevněn kolmo na osu prvního přes zelený díl. Deska (průhledná) je pevně uchycena kolmo na osu druhého motoru pomocí podpěry (žlutá). Nevýhodou tohoto řešení je, že se při natočení motorů deska vychyluje do strany. U horního motoru nejde o velký problém, ale vzdálenost desky od osy spodního motoru, je velká, což znamená, že se deska pohybuje do strany více, než u jiných řešení. Další nevýhodou je fakt, že veškerá váha, tj. horní motor, deska pro kuličku a 2 úchyty, je nesena spodním motorem, resp. jeho osou.

Výhodou je, že maximální náklon v obou osách je limitován pouze velikostí motorů, kdy při velkém náklonu může dojít ke kontaktu motoru s podložkou nebo zemí.



Obrázek 2.2 Kardanův závěs. Foto autor

2.1.2 Možnosti propojení motoru s deskou

Rameno na ose

K ose motoru je připojena páka, která je potom táhlem spojena s horní deskou. Motor se otáčí v rozsahu až 180° , resp. v intervalu od -90 do $+90$ stupňů od počáteční polohy, kdy je páka ve vodorovné poloze. Motor není potřeba natáčet v plném rozsahu, protože při natočení 45° je dosaženo přibližně 70% teoretického maximálního zdvihu, při konkrétní délce ramena. Velkou výhodou je možnost jednoduše změnit poměr mezi natočením motoru a natočením desky, pomocí výměny této páky za delší nebo kratší díl. Pokud má ovšem zvolený motor vůli v natočení, tato vůle se konstrukčně nedá odstranit, a způsobuje vůli v natočení horní desky, což téměř znemožňuje řízení.

Lineární šroub

Lineární šrouby převádí rotační pohyb na posuvný. Často jsou využívány ve výrobních linkách, kde umožňují posuv výrobku tak, aby se mohl zastavit ve více bodech své trajektorie. K motoru je šroub připojen pomocí hřídelové spojky.

Nevýhodou je složitější konstrukce, kdy je potřeba zajistit matici lineárního šroubu proti otáčení, a zároveň upravit šroub tak, aby se dal smontovat s motorem např. pomocí hřídelové spojky. Celá konstrukce je zároveň i vyšší, protože motor je namontován vertikálně.

Přímé spojení motoru s deskou

U konstrukce, kdy je deska přímo uchycená na ose motoru je nutné zajistit, že použitý motor a uchycení desky nemají žádnou vůli, která by měla vliv na řízení.

2.2 Snímání polohy kuličky

2.2.1 Kamera

Snímání polohy kuličky kamerou je levnější (pořizovací cena webkamery je oproti dotykovému panelu nižší), zároveň nabízí dobrou přesnost určování polohy díky rozlišení, které je často 1920x1080 pixelů. To znamená, že se kulička může pohybovat po velké ploše, případně ji můžeme sledovat s velkou přesností. Vliv na přesnost má ale i zpracování obrazového signálu.

Použití webkamery ovlivňuje návrh modelu, protože by kamera musela být umístěná v určité vzdálenosti od plochy, na které se nachází kulička. Při sledovacím úhlu kamery 60° a velikosti plochy 300 mm by kamera musela být ve vzdálenosti 260 mm od plochy. Kamera nebo deska s kuličkou, umístěná na sloupku, by tak musela být velmi pevně a stabilně spojena s podložkou, aby nedocházelo ke špatnému snímání polohy vlivem vibrační a otřesů samotného sloupku.

Nevýhodou webkamery je nutnost připojení USB kabelem (připojení ostatních vstupů bude realizováno přes desku MF624) a pomalejší řízení-většina webkamer nabízí maximálně 60 snímků za vteřinu, což znamená, že je kulička snímána každých 16,7 milisekund. Zároveň je pro ideální fungování potřeba zajistit stále světelné podmínky, a pozorovaná kulička musí být barevně odlišná od podložky. Vstupní obraz je poté potřeba zpracovat v prostředí Simulink.

Výhodou je možnost použít velkou řadu kuliček různých hmotností a velikostí, od pingpongového míčku, až po ložiskovou kuličku, za předpokladu, že budou mít jinou barvu, než podložka.

2.2.2 Dotykový panel

Na rozdíl od kamery, u dotykového panelu není potřeba zajistit světelné podmínky, a použití dotykového panelu nijak neovlivňuje výšku modelu. Je ovšem nutné zajistit, aby kulička působila na dotykový panel dostatečně velkou silou, přibližně 0,5 N. Nejčastěji se používají 2 druhy dotykových panelů, rezistivní a kapacitní.

Rezistivní dotykové panely:

Rezistivní dotykové panely se dříve využívaly u levnějších mobilních telefonů s dotykovým displejem, a velmi často je najdeme u dotykových displejů v průmyslu,

protože u nich není potřeba zajistit vodivé spojení pro detekci dotyku, a proto je můžeme ovládat např. v pracovních rukavicích nebo pomocí stylusu.

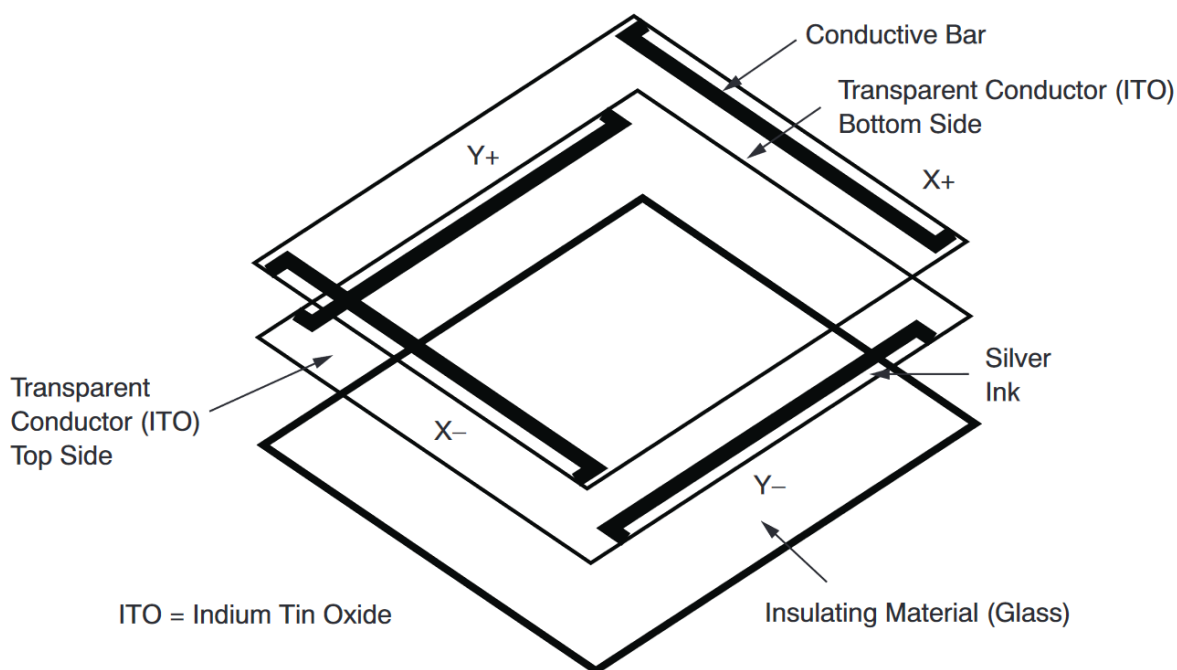
K tomu, aby se na tomto panelu dalo snímat místo dotyku, potřebujeme nějaký řadič. Existují zařízení, která se do počítače připojí pomocí USB, a ve vlastním softwaru zobrazují souřadnice dotyku. Další variantou je využití Arduina nebo podobného mikrokontroleru, kde vstupní data lze použít dále pro např. zobrazení místa doteku na displeji, nebo je lze dále zpracovat. Kontroler TSC2007 umožňuje zpracovat vstupy z dotykového panelu, a pomocí sběrnice I²C posílá data do mikrokontroléru, který je zpracuje, a pomocí rozhraní SPI a DA převodníku tvoří napěťový výstup, který je pro použití s MF624 vhodný.

Rozděluje je podle počtu vodičů na konektoru panelu, 4 nebo 5vodičové.

4vodičové

Princip fungování je následující: Na jednu elektrodu, například X+, je přivedeno napětí, elektroda na opačné straně, X-, je uzemněná. Při dotyku se vodivé vrstvy panelu spojí, a v druhé vrstvě, například na elektrodě Y+, se změří napětí, princip je stejný, jako u děliče napětí. Poté je napětí přivedeno na další elektrodu, Y+, a elektroda Y- je uzemněná. Rozložení elektrod je vidět na obrázku 2.3.

Existují i 8-mi vodičové panely, u kterých jsou na každou stranu přivedeny 2 vodiče místo jednoho. Tyto 4 vodiče měří referenční napětí (tj. skutečné napětí na elektrodě), které lze použít pro automatickou kalibraci, je-li dotykový panel používán v kombinaci s displejem.

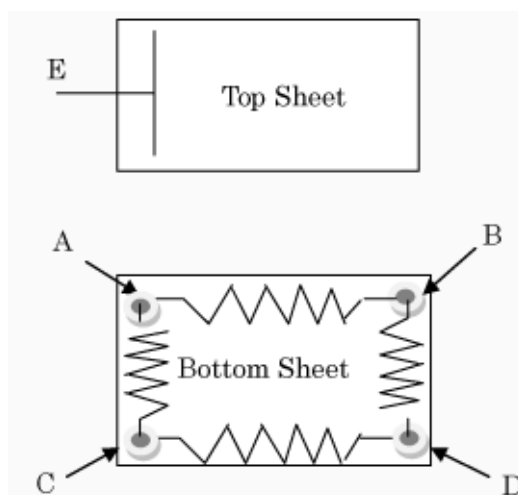


Obrázek 2.3 4vodičový dotykový panel. [5]

5vodičové

Princip je podobný jako u 4vodičových panelů. Rozdílné je to, že elektrody nejsou po celé straně panelu, ale v rozích, a jsou všechny 4 ve spodní vrstvě. Napětí je tedy přivedeno na 2 sousední elektrody, například A a B, zatímco další 2 jsou uzemněny. Vodičem, který je v horní vrstvě panelu, je změřeno napětí. Poté je napětí přivedeno na jinou dvojici elektrod, například B a D, a horním vodičem je opět změřeno napětí.

5-ti vodičové panely jsou tedy odolnější, a méně citlivé na poškození horní vrstvy, protože se v ní nenachází žádné elektrody, viz. Obrázek 2.4.



Obrázek 2.4 5vodičový dotykový panel. [6]

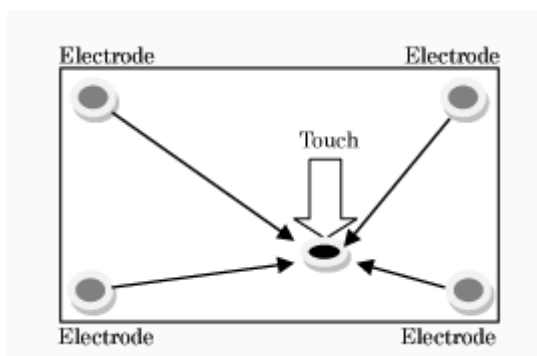
Kapacitní dotykové panely:

U kapacitních panelů není potřeba zatlačit na horní vrstvu, aby byl detekován dotyk, horní vrstva tedy může být pevnější a odolnější, zároveň může být pokryta další ochrannou fólií, jako např. u mobilních telefonů

Existují 2 druhy, surface a projected.

Surface

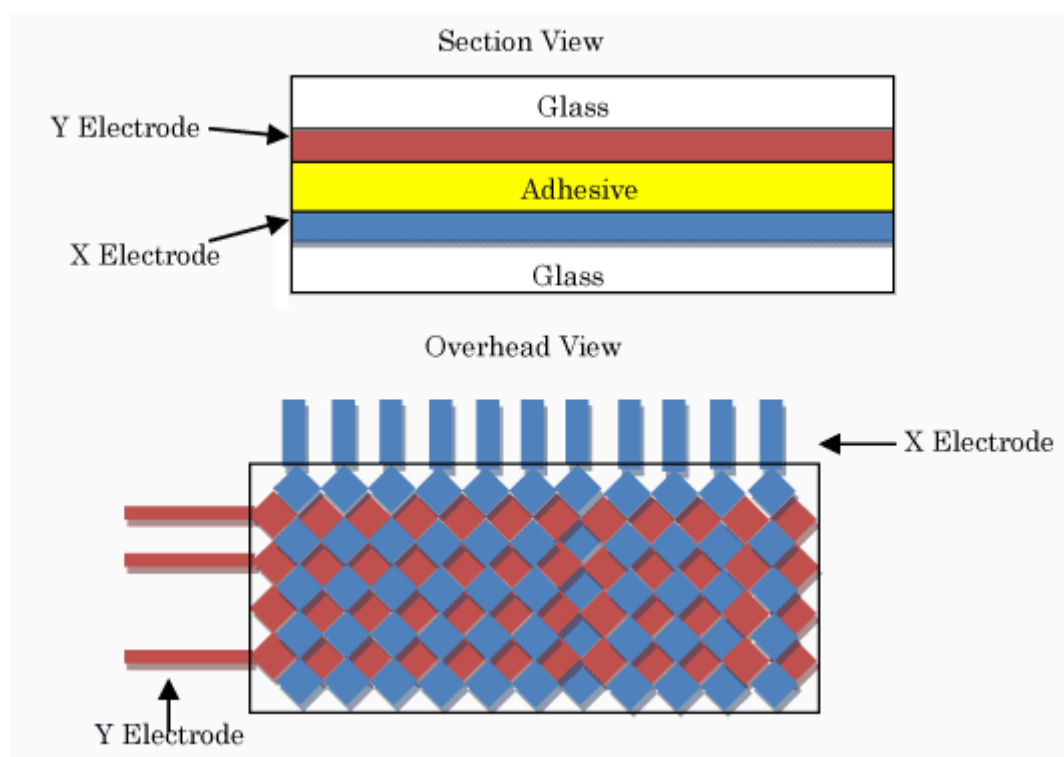
Na sklo (spodní desku) je umístěna vodivá vrstva, která je zakryta ochrannou vrstvou. Do všech rohů (obrázek 2.5) jsou umístěny elektrody, na každou je přivedeno malé napětí. Při dotyku dojde ke vzniku parazitní kapacity mezi elektrodami a uživatelem. Tím dojde ke změně odebíraného proudu ze všech elektrod, který je měřen a vyhodnocován. Předmět, kterým se panelu dotýkáme, musí být vodivý, jinak nevznikne parazitní kapacita. [1]



Obrázek 2.5 Kapacitní dotkový panel, metoda surface [7]

Projected

Na skleněné desce je vytvořena síť elektrod (obrázek 2.6), na kterou je přivedeno napětí, což vytvoří elektrické pole. Když se vodivý předmět dotkne (nebo dostatečně přiblíží) panelu, dojde ke změně kapacity, která je měřena. Tato technologie dotkových panelů dokáže detekovat více dotyků zároveň. Díky tomu najdou využití v mobilních telefonech, příp. laptotech. [2]



Obrázek 2.6 Kapacitní dotkový panel, metoda projected. [8]

IR mřížka

U infračervených panelů jsou po obvodu rozmístěny diody, vyzařující infračervené záření, a na opačných stranách je přítomnost dopadajícího paprsku detekována (fototranzistor). V místě dotyku dojde k zaclonění paprsku, čímž je dotyk detekován

v obou osách. Protože není oblast dotyku ničím pokryta, například krycí vrstvou, dotykový panel nabízí téměř nulové zkreslení obrazu, pokud je použit v kombinaci s displejem. IR mřížka dokáže detekovat více dotyků zároveň.

Nevýhodou je, že oproti rezistivním a kapacitním dotykovým panelům je IR mřížka vyšší (zabírá více prostoru nad plochou/obrazovkou), detekce místa dotyku není tak přesná, zároveň může být detekce dotyku ovlivněna silným zdrojem světla, např. sluncem.

2.3 Motory

2.3.1 Modelářské servo

Modelářská serva jsou, jak název napovídá, velmi často využívána v modelářství. Dá se pomocí nich např. řídit automobil (řízení natočení kol), přehazovat výhybky na kolejnici nebo ovládat natočení kormidla.

Nejčastěji nabízejí rozsah otočení $\pm 45^\circ$, ale některé modely (dle určení a výrobce) mají větší rozsah otáčení. Jejich připojení je velmi snadné, stačí 3 vodiče. Dva vodiče jsou zdroj napájení, a třetí je PWM signál se šířkou pulzu v rozsahu 1 až 2 ms.

Nevýhodou použití pro tento výukový model je jejich řízení. Vstupní PWM signál totiž určuje, jakého natočení má servo dosáhnout. Při řízení tedy není ovládán samotný motor, rozdíl ve skutečném a požadovaném natočení zpracuje vnitřní elektronika, která servem poté otočí. Při regulování tedy nejde výrazněji změnit rychlost reakce motoru.

Tato vlastnost poskytuje i některé výhody. Při správném nastavení řízení polohy totiž nemůže nastat, že by se servo dostalo na mechanický doraz, nebo podobný limit konstrukce, a narazilo do něj. Zároveň je, při správné montáži a doladění pozice, velmi jednoduché nastavit desku s kuličkou tak, aby byla ve vodorovné počáteční poloze.

2.3.2 Stejnoseměrný motor

Při použití DC motoru je nutné využít dostupný driver, který umožní měnit směr a především rychlost otáčení motorů, protože při malé odchylce polohy je nutná pomalejší reakce motoru. Vstupy driveru jsou různé, často to signály PWM a DIR. DIR určuje směr otáčení, má 2 logické hodnoty. Oproti servům tedy DC motory ovládáme přímo pomocí driveru.

Další výhodou DC motorů je možnost jejich snadného simulování v prostředí Simulink. V knihovně Simscape existuje blok „DC motor“, který dokáže spočítat (při správném zadání vstupních parametrů) chování motoru, včetně jeho rozběhu a brždění. Tato simulace zároveň umožňuje ověřit, zda zvolený motor vyhovuje požadavkům, které na něj máme (např. velikost odebíraného proudu).

DC motory se jeví jako optimální volba pro realizaci této práce, právě díky možnosti je přímo ovládat pomocí karty MF624, jednoduché možnosti ověřit jejich vlastnosti simulací a díky široké řadě nabízených motorů, ze které si můžeme vybrat.

2.3.3 Krokový motor

K řízení krokového motoru je také potřeba driver, jehož vstupy jsou požadovaný počet kroků, které má motor udělat, a také jeho rychlost. V některých případech není druhým vstupem požadovaná rychlost motoru, ale směr otáčení. Krokové motory nabízí velmi

přesné ovládání jejich natočení, podle zvoleného motoru a driveru je nabízená přesnost natočení motoru až jedna setina stupně.

Podobně jako u krokového motoru není potřeba zpětná polohová vazba, protože je zde možnost počítat výstup z řízení (požadované kroky). Pokud by však došlo k velkému zatížení motoru, může nastat situace, že se motor neotočí o požadovaný počet kroků. V praxi je k motoru připojen enkodér, který slouží k ověření, že motor udělal požadovaný počet kroků.

2.4 Počáteční nastavení desky

Aby bylo zajištěno, že horní deska je před spuštěním ve vodorovné poloze, je potřeba nějak snímat její polohu a desku do této správné pozice nastavit. Toto měření je potřeba realizovat hlavně u DC motorů, při použití servomotorů známe absolutní úhel jejich natočení, při použití krokových motorů se dá motor natočit do krajní polohy a dále můžeme počítat, kolik kroků motor udělá, než se dostane do požadované pozice.

2.4.1 Potenciometry

K motoru nebo matici lineárního šroubu je připojen potenciometr, dle zvoleného řešení je posuvný nebo otočný. Jeho odpor se mění s pohybem motoru, čímž vzniká dělič napětí. Měřené napětí tedy přesně odpovídá natočení motoru, a tím pádem i natočení horní desky.

Toto řešení je cenově výhodné a zároveň velmi jednoduché na připojení a měření.

2.4.2 Čidla pro měření vzdálenosti

Měření vzdálenosti může probíhat více způsoby. Prvním z nich je ultrazvuk, modul pro Arduino stojí cca 50 Kč. Princip spočívá v tom, že Arduinem (nebo kompatibilní deskou) je vyslán krátký (jednotky mikrosekund) signál do modulu, a na přijímači je sledována doba, za kterou se vyslaný vysokofrekvenční pulz odrazí zpátky.

V průmyslu jsou často využívány laserové snímače. Senzor snímá odražený paprsek a vyhodnocuje ho. Tyto zařízení mají vlastní několikapinový konektor, někteří výrobci nabízejí verze s analogovým (proudovým nebo napětovým) výstupem, častější však je výstup v datovém formátu, který pak zpracovává řídicí elektronika.

Nevýhodou obou čidel je nutnost opakovaně posílat signál pro získání dat (v případě senzoru s datovým výstupem), ultrazvukový senzor pro Arduino má přesnost 3 mm, což je pro potřeby modelu nevyhovující.

2.4.3 Enkodér

Enkodéry, jsou nejčastěji využívány u DC motorů, protože umožňují odečíst natočení motoru. U inkrementálního je jeho realizace možná tak, že se motor natočí do jedné krajní polohy, a poté je motor otočen o známý počet kroků, resp. signálů tak, aby byla horní deska ve vodorovné poloze. U absolutního není potřeba motor natočit do krajní pozice, protože u tohoto typu enkodéru známe okamžitou polohu, resp. natočení motoru.

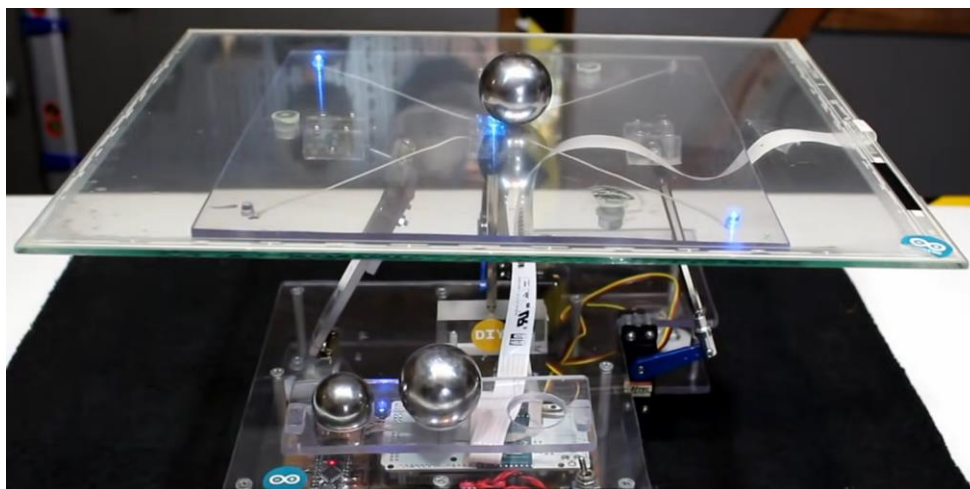
Výhodou inkrementálního enkodéru je jeho nižší cena, zároveň se dá koupit velká řada DC motorů, které mají tento enkodér namontovaný přímo na ose od výroby, čímž je usnadněna konstrukce.

2.5 Existující řešení

V následující kapitole bude uveden přehled několika existujících řešení s přehledem jejich vlastností. Tato řešení můžeme rozlišit do dvou kategorií, hobby a laboratorní.

Mechanický návrh u hobby řešení je velmi často podobný, 2 táhla, každé v jedné ose. Velká většina modelů ale používá servomotory, viz kapitola 2.3.1. Díky využití těchto pohonů se tak žádný model nezabývá ochranou těchto motorů, a počáteční nastavení desky do rovné polohy (je-li používáno) je realizováno také díky dalším vlastnostem těchto motorů. K detekci kuličky je využíván buď dotykový panel (nejčastěji rezistivní) nebo kamera.

Oba uvedené laboratorní modely používají ke snímání polohy kuličky kameru, detaily mechanického návrhu výrobci nesdělují.



Obrázek 2.7 Ukázka hobby řešení, řízená pomocí Arduina[10]

Společnost Humusoft prodává model s označením CE 151, který využívá kameru o rozlišení 1280x720 pixelů, a k pohybu desky jsou použity 2 krokové motory. Deska pro kuličku je podepřena v jejím středu.[4]



Obrázek 2.8 Humusoft. CE151 Kulička na ploše. [4]

Firma Leybold nabízí zařízení 33-240 “Ball & Plate systém“, které je řízeno pomocí programu LabView. Poloha kuličky je zjišťována také pomocí kamery. Výrobce uvádí, že deska s kuličkou je ovládána elektromagneticky.[9]



Obrázek 2.9 Leybold 33-240 [9]

2.6 Odvození rovnic

V této kapitole budou odvozeny rovnice, popisující pohyb kuličky po nakloněné rovině. Zároveň bude odvozena rovnice pro minimální poloměr ocelové kuličky, pokud by byl použit rezistivní dotykový panel.

2.6.1 Minimální hmotnost kuličky

Pokud je použit dotykový panel, je potřeba vzít v úvahu údaje výrobce, který udává minimální detekovanou sílu. Při maximálním naklonění desky, které bylo zjištěno v simulaci, je tedy minimální hmotnost kuličky:

$$m = \frac{F}{g \cdot \cos \alpha}, \quad (2.1)$$

kde

m je hmotnost, F je minimální detekovaná síla, g je tíhové zrychlení a α je maximální úhel, o který se horní deska natočí.

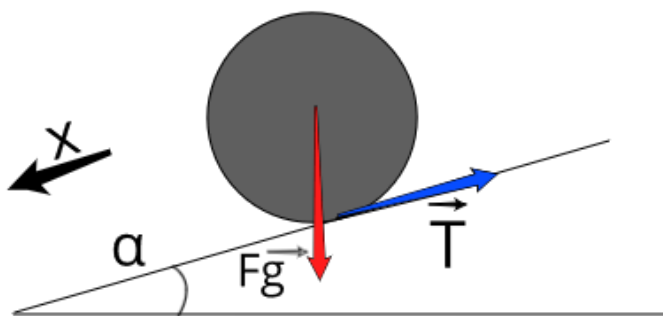
Po dosazení do rovnice (2.1) zjistíme minimální hmotnost ocelové kuličky. Tato hodnota odpovídá kuličce o poloměru:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}, \quad (2.2)$$

kde

r je poloměr kuličky, m je její hmotnost a ρ je hustota oceli.

2.6.2 Rovnice pohybu kuličky



Obrázek 2.10 Síly působící na kuličku na nakloněné rovině

Platí:

$$F = m \cdot \ddot{x} \quad (2.3)$$

Podle obrázku 2.10 předpokládám souřadný systém tak, že kladné x je ve v opačném směru než třecí síla T , tím pádem platí [11][12]:

$$x: m \cdot g \cdot \sin \alpha - T = m \cdot \ddot{x}, \quad (2.4)$$

kde m je hmotnost kuličky, \ddot{x} je zrychlení hmotného středu kuličky

Dále platí:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (2.5)$$

kde J je moment setrvačnosti kuličky, a M je suma momentů působících na osu otáčení

Po dosazení do rovnice (2.5):

$$J \frac{d\omega}{dt} = T \cdot R \quad (2.6)$$

Dále platí:

$$\dot{x} = R \cdot \omega, \quad (2.7)$$

kde \dot{x} je rychlost hmotného středu.

Derivací rovnice (2.7) získáme:

$$\ddot{x} = R \frac{d\omega}{dt} \quad (2.8)$$

Úprava:

$$\frac{\ddot{x}}{R} = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.9)$$

Dosadíme rovnici (2.9) do rovnice (2.6):

$$T = J \frac{\ddot{x}}{R^2} \quad (2.10)$$

Dosadíme rovnici (2.10) do rovnice (2.4):

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha - J \frac{\ddot{r}}{R^2} = m \cdot \ddot{r} \quad (2.11)$$

Nyní je potřeba spojit natočení motoru s natočením desky. Podle zvoleného řešení spojení motorů s horní deskou existují 3 rovnice.

Rovnice pro lineární šroub

Platí, že při otočení motoru o jednu otáčku ($=2\pi$) se matice lineárního vedení posune nahoru o p (=stoupání závitu). Platí tedy:

$$d = \frac{\varphi_M}{2\pi} \cdot p \quad (2.12)$$

, kde φ_M je úhel natočení motoru a d je výška, o kterou se lineární matice posune nahoru.

Dále platí:

$$\sin \alpha = \frac{d}{L}, \quad (2.13)$$

kde L je polovina délky horní desky (= délka od kraje ke středu otáčení).

Po dosazení rovnic (2.13) a (2.12) do rovnice (2.11) tedy platí:

$$m \cdot g \cdot \frac{\frac{\varphi_M}{2\pi} \cdot p}{L} - J \frac{\ddot{r}}{R^2} = m \cdot \ddot{r} \quad (2.14)$$

Po úpravě:

$$\ddot{r} = \frac{m \cdot g \cdot \varphi_M \cdot p}{2\pi \cdot L \cdot \left(m + \frac{J}{R^2}\right)} \quad (2.15)$$

Rovnice pro rameno na ose motoru

V případě, že naklonění desky bude ovládat motor s ramenem, platí, že při natočení motoru o úhel φ_M se deska nakloní o úhel γ . Závislost mezi těmito úhly vyjadřuje rovnice:

$$b \cdot \sin \varphi_M = L \cdot \sin \alpha, \quad (2.16)$$

kde b je délka ramene na ose motoru a L je vzdálenost úchyty táhla od osy otáčení desky.

Rovnici můžeme linearizovat, za předpokladu, že se úhly φ_M a α mění v intervalu $<-5^\circ; +5^\circ>$, a díky tomu funkce sinus nahradit jejich argumenty.

Po úpravě a dosazení tedy platí:

$$m \cdot g \cdot \frac{b}{L} \cdot \varphi_M - J \frac{\ddot{r}}{R^2} = m \cdot \ddot{r} \quad (2.17)$$

Po úpravě:

$$\ddot{r} = \frac{m \cdot g \cdot \varphi_M \cdot b}{L \cdot \left(m + \frac{J}{R^2}\right)} \quad (2.18)$$

Rovnice pro desku namontovanou na ose motoru

V případě, že bude deska spojena přímo s osou motoru, bude náklon desky odpovídat natočení motoru:

$$m \cdot g \cdot \sin \varphi_M - J \frac{\ddot{r}}{R^2} = m \cdot \ddot{r} \quad (2.19)$$

Po úpravě:

$$\ddot{r} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \varphi_M}{L \cdot \left(m + \frac{J}{R^2}\right)} \quad (2.20)$$

Výsledné rovnice (2.15), (2.18) a (2.20) popisují pohyb kuličky po nakloněné rovině, a její závislost na natočení motoru φ_M .

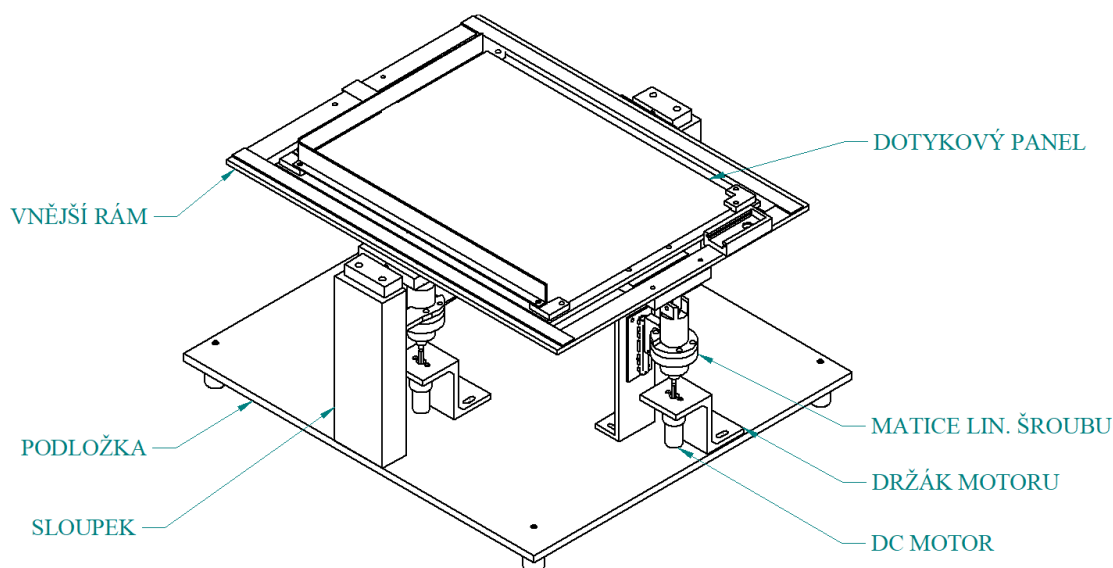
3 Postup a výsledky řešení

V této kapitole budou z výše zmíněných možností zvoleny jednotlivé komponenty a odůvodněna jejich volba.

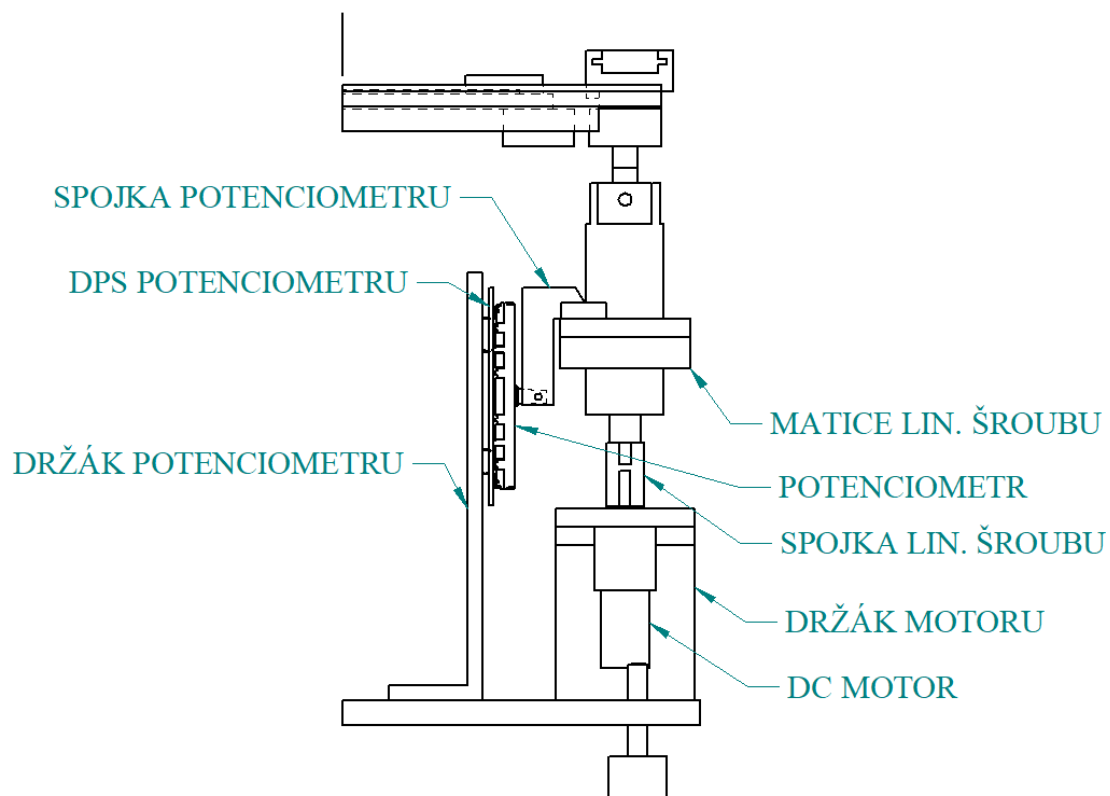
3.1 Zvolené řešení mechanického návrhu

Jako mechanické řešení byla zvolena varianta s vnějším rámem a dvěma nezávislými osami, kvůli větší stabilitě desky s dotykovým panelem. Náklon byl realizován stejnosměrnými motory s lineárními šrouby, protože se ukázalo, že zvolené motory s převodovkou měly vůli v natočení, přibližně 4° . Zvolený lineární šroub (s dostatečně malým stoupáním) vliv této vůle výrazně zmenšuje.

Na obrázku 3.1 je vidět celý CAD model s popisem některých dílů, na obrázku 3.2 je ukázána sestava motoru s lineárním šroubem a připojeným potenciometrem. Tyto sestavy jsou v modelu dvě, každá pro jednu osu, a liší se pouze uchycením k hornímu rámu.



Obrázek 3.1 CAD model zařízení

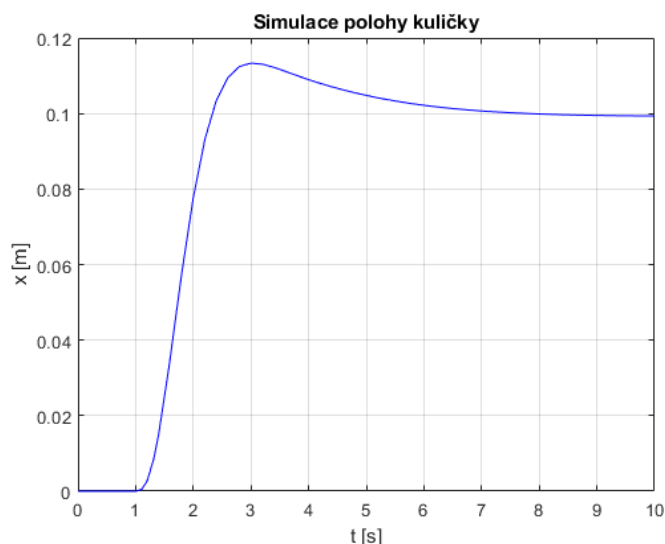


Obrázek 3.2 Detail motoru s lineárním šroubem a potenciometrem

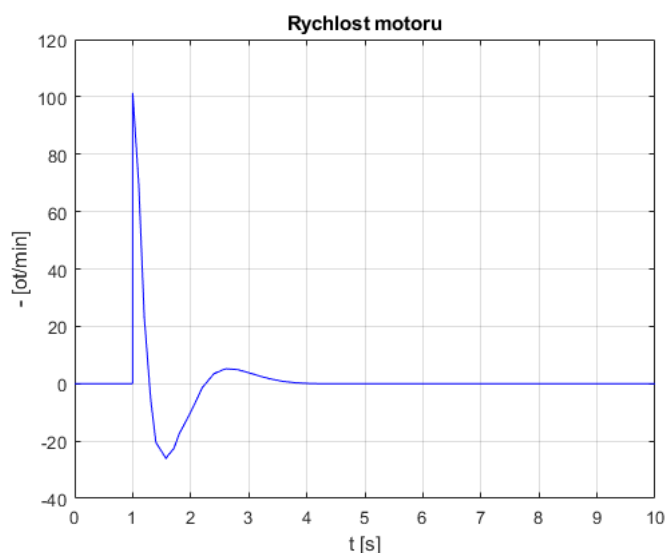
3.2 Výpočty

3.2.1 Model v Simulinku

V prostředí Simulink bylo celé zařízení modelováno, aby bylo zjištěno, jakou nejvyšší rychlost musí mít zvolené DC motory. Zároveň byl zjištěn největší náklon desky. Do modelu tedy byla vložena rovnice (2.15), a k ní byla vytvořena PID polohová regulace. Jako vzorová situace byl zvolen posuv kuličky o 10 cm.



Obrázek 3.3 Časový průběh polohy kuličky



Obrázek 3.4 Časový průběh rychlosti motoru

Ze simulace vyplývá, že lineární šroub se stoupáním závitu 50 mm je v kombinaci se zvoleným motorem, jehož maximální rychlost je 100 otáček za minutu, dostatečný. V případě, že by byla vyžadována rychlejší stabilizace kuličky, je nutné použít rychlejší motor.

3.2.2 Hmotnost kuličky

Do rovnice (2.1) dosadíme tyto údaje: $F = 0,49$ newtonů, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\alpha = 2,5^\circ$

Po dosazení těchto hodnot zjistíme, že minimální hmotnost kuličky je 50 gramů. Tyto údaje dosadíme do rovnice (2.2):

Dosazení: $m = 0,05 \text{ kg}$, $\rho = 7850 \text{ kgm}^{-3}$.

Vypočítaný poloměr kuličky je 11,4 mm, což znamená, že průměr kuličky musí být minimálně 22,8 mm (u kuličky z oceli). Ve skutečnosti bylo použito více ocelových

kuliček o průměrech 23, 27 a 30 mm, aby mohli studenti pozorovat vliv momentu setrvačnosti.

3.3 Volba ostatních komponentů

Použité komponenty byly voleny tak, aby model byl co nejvíce „samostatný“, tedy aby v prostředí Simulink nebylo potřeba vstupní data dále upravovat, např. přepočítávat digitální signál. Proto byly voleny komponenty, jejichž výstupem je přímo napětí, nebo jiný typ dat, který lze přímo číst pomocí MF624.

Z tohoto důvodu byl zvolen rezistivní dotykový panel, s efektivní plochou přibližně 31x23 cm. V Mechlabu již existoval kontroler pro dotykový panel, jehož výstupem jsou dvě hodnoty napětí, které se mění podle místa dotyku na panelu.

DC motory byly využity s ohledem na možnost je přímo řídit pomocí MF624, jednoduchost simulace a výpočtem ověřené požadavky. Zároveň pro oba motory existoval jeden driver, typ Pololu Dual MAX14870 Motor Driver Shield for Arduino, což usnadnilo zapojování a návrh vlastní desky plošných spojů.

Zvolený driver umožňuje ovládat 2 DC motory s napájecím napětím 4,5 až 36 V, s maximálním proudem 1,7 A pro každý motor. [3]



Obrázek 3.5 Driver dvou DC motorů [3]

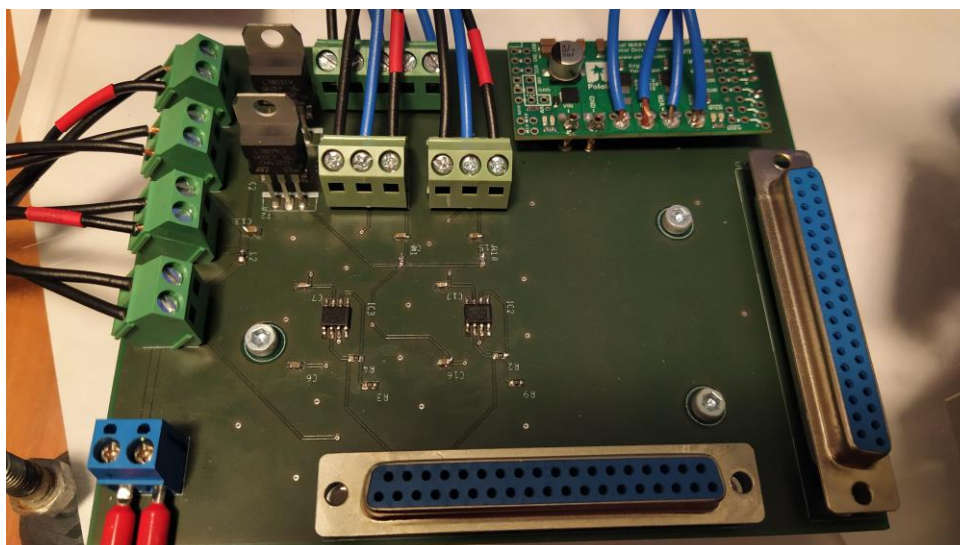
Počáteční nastavení desky je realizováno pomocí potenciometrů, spojených s maticí lineárního šroubu motoru pomocí dílu vytisknutého na 3D tiskárně. Zdvih použitého potenciometru je 50 mm, vstupní napětí je 5 V. Při posuvu lineárního šroubu v rozsahu 18 mm by rozdíl naměřených hodnot byl 1,8 V. Aby bylo měření a regulace polohy přesnější, je výstupní napětí potenciometru zesíleno pomocí operačního zesilovače zapojeného v neinvertujícím zapojení.

Měřeného napětí z potenciometrů je využito i při řízení. Napětí je přepočítáváno na úhel natočení desky, a zároveň je model v Simulinku zastaven v případě, že napětí dosáhne takových hodnot, kdy by mohlo dojít ke kolizi a případnému poškození modelu.

Vše je zapojeno do vlastní desky plošných spojů, která zajišťuje napájení všech komponentů a přivádí všechny výstupy do dvou konektorů, pomocí kterých je model připojen k počítači. Hlavními prvky desky, na obrázku 3.6, jsou:

- Vstupní svorkovnice pro zapojení zdroje napájení
- Driver stejnosměrných motorů
- Svorkovnice pro připojení vodičů kontroleru dotykového panelu
- Dvě svorkovnice pro připojení vodičů potenciometru
- Čtyři svorkovnice, umožňující připojení spínačů se signalizací

- Dva výstupní konektory umožňující propojení s kartou MF624

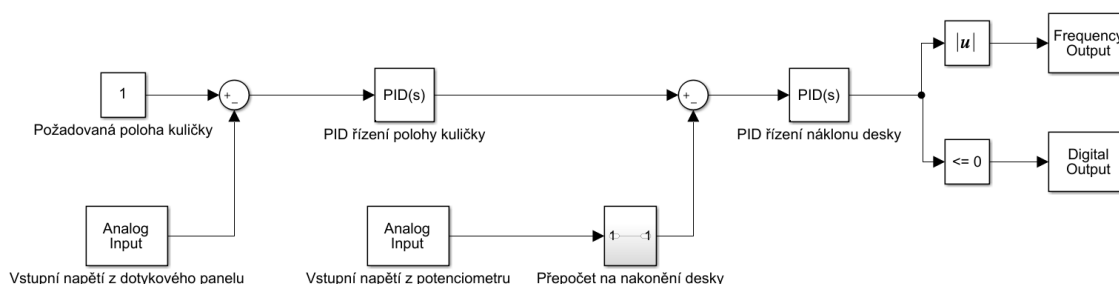


Obrázek 3.6 Deska plošných spojů dle vlastního návrhu. Foto autor

Na levé straně je vidět čtveřice svorkovnic, sloužící k připojení ovládacího modulu, který se skládá z dvojice vypínačů a dvojice LED diod, které signalizují, zda byla příslušná část obvodu spuštěna. Jeden vypínač přivádí napětí k potenciometrům a kontroleru dotykového panelu, druhý přivádí napětí k driveru motorů, čímž je zajištěno, že se v případě kolize modelu dají motory rychle zastavit, aby nedošlo k dalšímu poškození.

3.4 Ukázková úloha

Model byl kompletně vyroben, poskládan a zapojen, a k ověření funkčnosti bylo vytvořeno řízení. Na obrázku je ukázán jeho princip. Blok „Frequency output“ ovládá rychlost otáčení motoru, výstup na PCI kartě je PWM signál. Blok „Digital output“ ovládá směr otáčení motoru, jeho výstupem je logická 1 nebo 0.

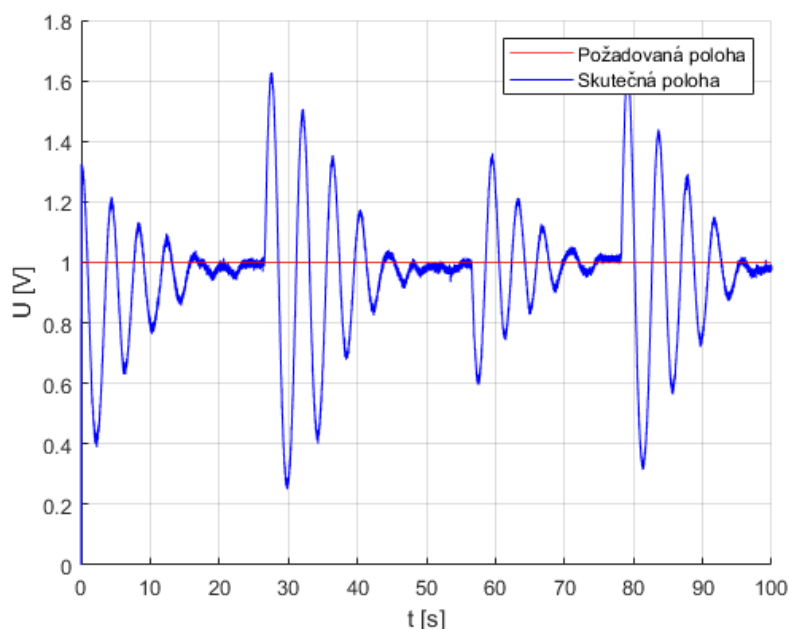


Obrázek 3.7 Řízení polohy kuličky

První vstup je regulátor polohy kuličky, kdy je požadovaná poloha odečtena od skutečné, a výstup z tohoto regulátoru je poté použit jako vstup do regulátoru náklonu desky, který ovládá motory. Hodnoty P, I a D u regulátoru polohy kuličky byly nastaveny tak, aby výstup, tedy požadovaný náklon desky, svou hodnotou odpovídal takovým hodnotám náklonu, kterých model může dosáhnout. Regulátor náklonu byl naladěn tak, aby reagoval dostatečně rychle a silně, a aby zároveň nedocházelo k velkým překmitům při nastavování požadovaného náklonu. Metoda PID byla zvolena,

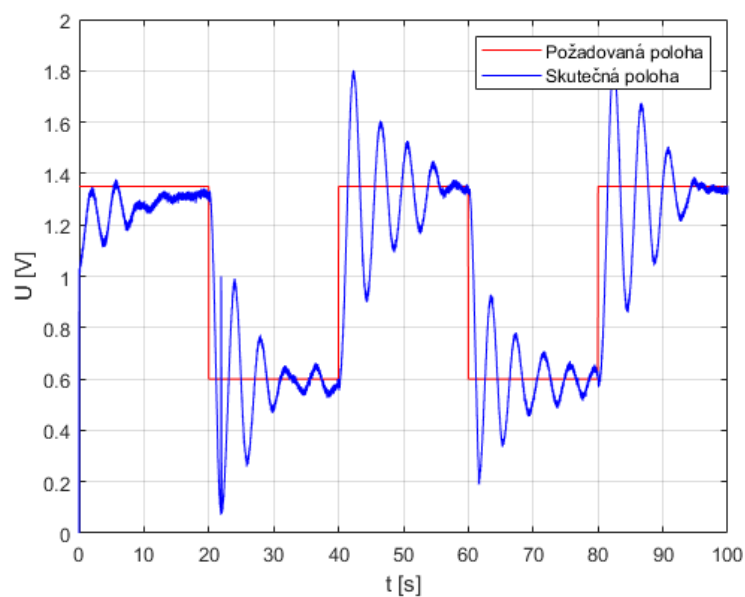
protože s ní studenti mají nejvíce zkušeností, a nevyžaduje žádnou znalost výukového modelu, např. kvůli odvození rovnic.

K ověření funkčnosti modelu byly vytvořeny 3 ukázkové úlohy. První je stabilizace kuličky v jednom bodě, kdy je kulička ručně posunuta po desce, a řízení kuličku posune do požadované polohy. Graf průběhu napětí na dotykovém panelu (a tedy polohy kuličky) je na obrázku 3.8:



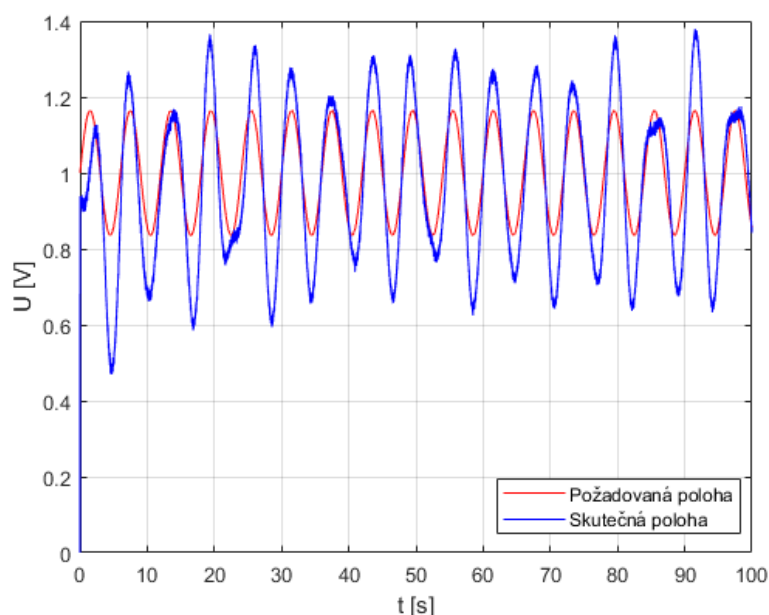
Obrázek 3.8 Časový průběh polohy kuličky, stabilizace v jednom bodě

Další úloha je podobná předchozí. Požadovaná poloha kuličky se mění mezi dvěma body. Graf průběhu polohy je na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9 Časový průběh polohy kuličky, přesun mezi dvěma body

V třetí ukázkové úloze kulička sleduje trajektorii kružnice. Protože má dotykový panel obdélníkový tvar, požadované napětí se v obou osách liší. Průběh polohy kuličky v jedné ose ukazuje obrázek 3.10.



Obrázek 3.10 Časový průběh polohy kuličky, kruhová trajektorie

Naladění řízení kuličky se ukázalo jako velmi obtížné, protože byly vytvořeny 2 regulátory, regulátor polohy kuličky a regulátor náklonu desky, které se samostatně nedají naladit. To byl hlavní důvod, proč stabilizace kuličky byla pomalá. Dalším důvodem, ale již ne tak velkým, bylo filtrování vstupního napětí, které způsobovalo malé zpoždění měřených napětí.

3.5 Návod

Součástí modelu je i návod, který popisuje, jak vytvořit řízení pro celý výukový model. Student nejprve vyzkouší měření napětí na dotykovém panelu, poté změří napětí na potenciometrech. V dalším kroku jsou rozpořehovány motory, a je vyzkoušeno nastavení desky do vodorovné polohy pomocí PID regulace natočení motoru podle změřeného napětí na potenciometru. Poslední krokem je vytvoření polohové regulace kuličky.

Návod je umístěn v příloze této práce.

4 Závěr

Hlavním cílem práce bylo navržení a následná realizace a zprovoznění výukového modelu kulička na plošině. Při návrhu byl brán potaz na jednoduchost, spolehlivost, cenovou výhodnost a to, aby se studenti při práci s modelem naučili tvořit model v Simulinku, pomocí kterého ovládají motory.

Byl vytvořen 3D model, jehož funkce byla ověřena simulací, a poté byl model sestaven a bylo vytvořeno řízení.

Motory, zvolené podle simulace, se ukázaly jako dostačující, což dokazuje, že simulace byla provedena správně.

Po výrobě a zkompletování konstrukce se ukázalo, že se vnější horní rám na koncích prohýbá. Rám byl nahrazen novým dílem ze silnějšího materiálu a byl vyztužen hliníkovým profilem.

Kvůli složitějšímu řízení, obsahující 2 regulátory, se ovšem řízení nepovedlo naladit tak, aby byla využita jejich maximální rychlost, což znamená, že i regulace polohy kuličky je v aktuálním stavu velmi pomalá.

V budoucnu by bylo vhodné lépe naladit řízení tak, aby byla stabilizace kuličky rychlejší. Dále by bylo vhodné lépe vyřešit vedení kabeláže v modelu.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] NOVÁK, M.: Principy dotykových panelů a jejich využití v automatizaci. *Elektro* [online]. FCC Public. 02/2009. [Cit. 28.4.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/principy-dotkovych-panelu-a-jejich-vyuziti-v-automatizaci--10988>
- [2] BARRETT, G., OMOTE, R. Projected-Capacitive Touch Technology [online]. 2010. [Cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee2/docs/art6.pdf>
- [3] Pololu. Dual MAX14870 Motor Driver [online]. 2018. [Cit. 15.4.2020]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2519>
- [4] Humusoft. CE151 Kulička na ploše. [online] 2020. [Cit. 22.6.2020]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/models/ce151/>
- [5] Texas Instruments. TSC2007 Datasheet. [online]. 2.3.2009. [cit. 27.4.2020]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tsc2007.pdf?ts=1593066826833&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTSC2007
- [6] DMC Co., Ltd. Technologies of touch screen [online]. ©2011. [Cit. 29.4.2020]. Dostupné z: <https://www.dmccoltd.com/english/museum/touchscreens/technologies/5-wire.asp>
- [7] DMC Co., Ltd. Technologies of touch screen [online]. ©2011. [Cit. 29.4.2020]. Dostupné z: <https://www.dmccoltd.com/english/museum/touchscreens/technologies/Surface.asp>
- [8] DMC Co., Ltd. Technologies of touch screen [online]. ©2011. [Cit. 29.4.2020]. Dostupné z: <https://www.dmccoltd.com/english/museum/touchscreens/technologies/Projected.asp>
- [9] Leybold. Ball & plate systém. [online]. 2021. [Cit. 18.5.2021]. Dostupné z: <https://www.leybold-shop.com/ball-and-plate-system-33-240.html>
- [10] NOMAN, G. a ABO-ALREJAL, M. Ball on plate PID controller with Arduino. [online]. 3.5.2015. [Cit. 1.6.2020]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=K-F_T59ZDPw
- [11] Valení po nakloněné rovině. [online]. 2020. [Cit. 1.10.2020]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/mechanika/7_3
- [12] Ball and beam: System modelling. [online]. 2020. [Cit. 15.10.2020]. Dostupné z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling>

Seznam obrázků:

Obrázek 2.1 Naklonění táhla při natočení druhého motoru. Foto autor	9
Obrázek 2.2 Kardanův závěs. Foto autor.....	10
Obrázek 2.3 4vodičový dotykový panel. [5].....	12
Obrázek 2.4 5vodičový dotykový panel. [6].....	13
Obrázek 2.5 Kapacitní dotykový panel, metoda surface [7].....	14
Obrázek 2.6 Kapacitní dotykový panel, metoda projected. [8]	14
Obrázek 2.7 Ukázka hobby řešení, řízená pomocí Arduina[10].....	17
Obrázek 2.8 Humusoft. CE151 Kulička na ploše. [4]	17
Obrázek 2.9 Leybold 33-240 [9].....	18
Obrázek 2.10 Síly působící na kuličku na nakloněné rovině.....	19
Obrázek 3.1 CAD model zařízení.....	22
Obrázek 3.2 Detail motoru s lineárním šroubem a potenciometrem	23
Obrázek 3.3 Časový průběh polohy kuličky.....	24
Obrázek 3.4 Časový průběh rychlosti motoru	24
Obrázek 3.5 Driver dvou DC motorů [3].....	25
Obrázek 3.6 Deska plošných spojů dle vlastního návrhu. Foto autor.....	26
Obrázek 3.7 Řízení polohy kuličky	26
Obrázek 3.8 Časový průběh polohy kuličky, stabilizace v jednom bodě	27
Obrázek 3.9 Časový průběh polohy kuličky, přesun mezi dvěma body.....	27
Obrázek 3.10 Časový průběh polohy kuličky, kruhová trajektorie	28

Seznam příloh:

1. Návod k obsluze výukového modelu kulička na plošině
2. Model kuličky na plošině s PID regulátorem
3. Soubory .stp ke všem vyráběným dílům
4. Data k výrobě desky plošných spojů v programu EAGLE
5. Soubor .slx k ovládání výukového modelu